

The Influence of Climate Change and Climatic Variability on the Hydrologic Regime and Water Resources (Proceedings of the Vancouver Symposium, August 1987). IAHS Publ. no. 168, 1987.

Les conséquences durables de la sécheresse actuelle sur l'écoulement du fleuve Sénégal et l'hypersalinisation de la Basse-Casamance

J.C. Olivry

Orstom 213 rue La Fayette 75010 Paris, France

RESUME Dans les régions soudano-sahéliennes, l'actuelle sécheresse se distingue des événements déficitaires antérieurs par ses conséquences durables sur les régimes hydrologiques de basses-eaux liées à l'épuisement des aquifères. Ainsi, les hydrogrammes du fleuve Sénégal montrent après la crue annuelle une période de tarissement exponentiel dont le coefficient très stable pendant 70 ans ($a = 0.0186 \text{ j}^{-1}$), est devenu de plus en plus fort au cours des dernières années ($a = 0.038 \text{ j}^{-1}$ en 1984). De même, l'intrusion marine en Basse-Casamance a considérablement augmenté en saison sèche depuis 1973. Les marigots ont un gradient de salinité positif vers l'amont leur évaporation n'étant plus compensée par l'alimentation des nappes souterraines aujourd'hui tarées (sursalure jusqu'à 150% contre 35% auparavant). Les précipitations plus abondantes 1984-85 n'ont pas renversé la tendance. L'éventuel retour de conditions climatiques favorables n'entraînera pas le rétablissement immédiat des régimes antérieurs. Une réversibilité totale suppose la reconstitution des aquifères qui exigera une longue période humide non interrompue.

Mots-clefs: Sénégal, sécheresse, réserves souterraines, tarissement, intrusion saline.

Persistent consequences of the present drought on the flows of the Senegal River and the hypersalinisation of the Lower Casamance

ABSTRACT In Sahelian and Sudanese regions, the persistent consequences of the present drought differentiate it from other dry spells of the 20th century. Two investigations carried out in Senegal showed the part of a major depletion of groundwater storage. After the annual flood, the hydrographs of the Senegal River showed discharges falling off exponentially according to a depletion coefficient without large change during seventy years (mean value: $a = 0.0186 \text{ day}^{-1}$). This trend has been altered over the present drought showing an increasingly rapid decline ($a = 0.038 \text{ day}^{-1}$ in 1984). Marine intrusion and tidal influences characterize the Lower Casamance. In dry season, until 1973, salinity decreased going upstream (maximum < 35%). Actually, the salinisation gradient has

become positive going upstream (maximum > 150%) because evaporation is not compensated by groundwater reserves which are almost fully depleted. The more abundant rainfalls in 1984-85 did not reverse this trend. These examples demonstrate that even if climatologic conditions improve, the return of former hydrologic regimes will not be immediate. It requires the reconstitution of groundwater reserves (several wet years without further dry spells).

Keywords: Senegal, drought, groundwater reserves, depletion, salt intrusion.

Introduction

Le caractère exceptionnel du phénomène actuel de la sécheresse dans les régions soudano-sahéliennes n'est plus à démontrer. L'étude des déficits pluviométriques de la zone intertropicale de l'Afrique a montré depuis une quinzaine d'années un phénomène global de détérioration climatique. Ces déficits se sont largement répercutés et généralement amplifiés, dans l'écoulement des bassins fluviaux. Par l'intégration spatiale du régime des précipitations qu'elle suppose sur l'ensemble d'un bassin versant, la variabilité de l'écoulement annuel constitue un paramètre de choix dans l'étude des fluctuations climatiques. Dans ce cadre de recherches, le Sénégal offre à Bakel la plus longue série chronologique de modules en Afrique de l'Ouest. Diverses études ont montré que l'événement actuel se différencie nettement des autres épisodes déficitaires du XX^{ème} siècle par son intensité et sa durée (Sircoulon, 1985 - Olivry, 1983). Malgré des fluctuations de large amplitude qui ont pu faire penser à des variations pseudocycliques, on a mis en évidence sur le fleuve Sénégal une tendance générale à la baisse depuis le milieu du XIX^{ème} siècle (Olivry *et al.* 1986).

Sans préjuger d'une poursuite de cette tendance ou au contraire d'un retour à une période humide, il apparaît nettement que la sécheresse actuelle aura des conséquences durables sur certains paramètres hydrologiques. Après la relative amélioration des conditions pluviométriques observée en 1985 et 1986, un "effet mémoire de la sécheresse" est nettement apparu dans l'écoulement des grands bassins fluviaux. Mais il est encore trop tôt pour y voir le poids de modifications pérennes du milieu physique (états de surface et végétation) sur l'ensemble des composantes des régimes hydrologiques. Au niveau des paramètres principaux de l'écoulement (modules et maximum annuels), on assiste à une détérioration des valeurs médianes sans grande incidence au niveau des lois de distribution et s'apparentant davantage à une dérive de l'échantillon d'observation qu'à un bouleversement fondamental du régime hydrologique (Olivry, 1986a).

Un retour à des conditions très humides entraînerait probablement un retour à des conditions d'hydraulicité comparables à celles déjà observées dans le passé. Par contre, au niveau des basses-eaux et des phases de tarissement, "l'effet mémoire" de l'actuelle période déficitaire est particulièrement déterminant: l'éventuel retour à des conditions climatologiques favorables n'entraînera pas le rétablisse-

ment immédiat du régime hydrique antérieur. L'appauvrissement considérable des aquifères a entraîné une modification du régime des basses-eaux qui se traduit sur le fleuve Sénégal dans l'écoulement qui suit l'hydrogramme de crue et en Basse-Casamance par l'hypersalinitisation des marigots en saison sèche (cf. carte de situation figure 1).

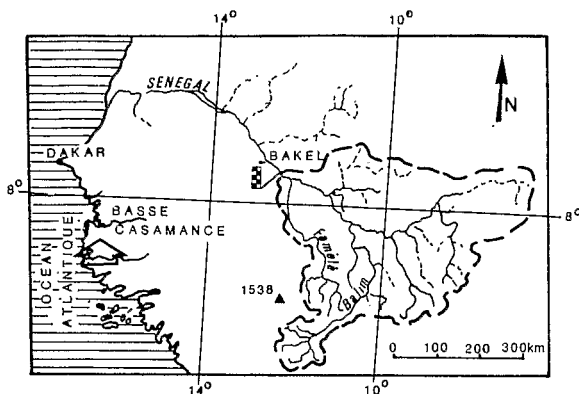


Figure 1 Carte de situation.

Le tarissement du fleuve Sénégal

Les débits du fleuve Sénégal sont observés depuis 1903 à la station de Bakel (A: 218 000 km²). Diverses corrélations entre les données historiques et les observations hydrologiques ont permis d'évaluer le module interannuel de la seconde moitié du XIX^{ème} siècle à environ 900 m³ s⁻¹ (op. cit.). Pour les 84 années d'observations, ce module interannuel n'est plus que de 702 m³ s⁻¹; avec l'actuelle sécheresse le module moyen des quinze dernières années tombe à 390 m³ s⁻¹; il ne dépasse pas 284 m³ s⁻¹ pour les 5 dernières années, la maximum minimorum ayant été atteint en 1984 (205 m³ s⁻¹). En 1985 et 1986, les précipitations reçues par le bassin se sont rapprochées de la normale mais avec une répartition telle que l'écoulement est resté très déficitaire.

Ce sont d'ailleurs ces effets de la répartition des pluies au cours de la saison humide qui expliquent que l'on a rarement sur un grand bassin fluvial de très bonnes corrélations hydropluviométriques. La chronique des modules du Sénégal à Bakel est présentée dans la figure 2 (cf. aussi tableau 1).

Dans l'étude du fleuve Sénégal, C. Rochette (1974) a montré qu'après une rapide phase de décrue en septembre-octobre on abordait une période de tarissement où la décroissance des débits suit les lois exponentielles classiques ($Q_i = Q_0 e^{-at}$). Cette première phase de tarissement couvre généralement les mois d'octobre à janvier pour une gamme de débits de 500 à 50 m³ s⁻¹ et le coefficient de tarissement moyen sur 60 ans est de 0.018 j⁻¹. C. Rochette décrit une seconde phase de tarissement beaucoup plus rapide en dessous de 50 m³ s⁻¹. Appelée phase d'épuisement, cette période ne concernerait plus que

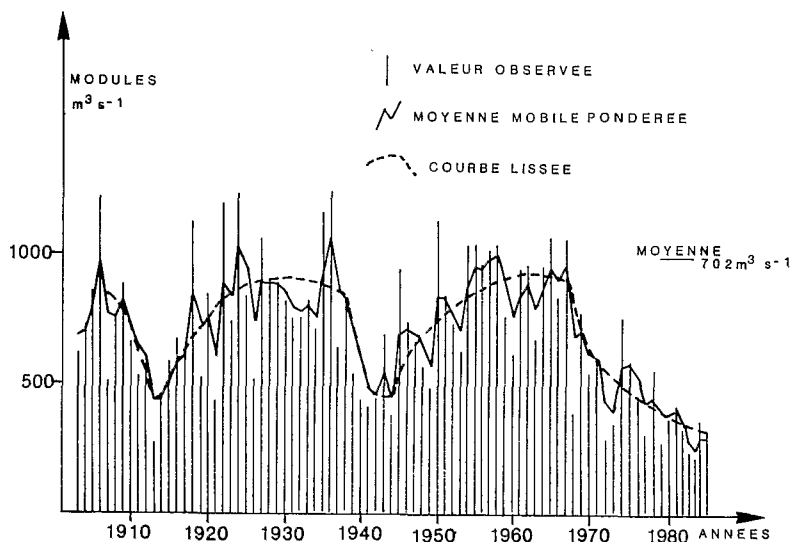


Figure 2 Modules du Sénégal à Bakel.

les réserves de la vallée alluviale coupées des ressources des aquifères amont. Le coefficient de tarissement est de 0.045 j^{-1} . C'est cette phase qui a conduit ces dernières années à une interruption de l'écoulement du fleuve de quelques jours à quelques semaines.

La première phase de tarissement, par les volumes qu'elle implique et sa représentativité de l'ensemble des aquifères du bassin constitue une caractéristique importante du régime hydrologique du fleuve Sénégal. L'étude des coefficients de tarissement (tableau 1) montre jusqu'aux années 1972-73 une remarquable régularité des valeurs. Sur 70 ans, la moyenne est de 0.0186 j^{-1} et l'écart type de 0.0014 j^{-1} ($Cv = 0.075$). Les minimums (0.016 j^{-1}) correspondent aux périodes humides (années 1925-28, 1935-37, 1955-60 et 1964-68) avec une richesse et une extension maximale des aquifères. Les maximums (0.022 j^{-1}) correspondent aux périodes sèches (1913, début des années 70) mais aussi à des années abondantes comme 1922-23 ou 1950-53; les déficits des années 40 ne sont pas marqués au niveau du tarissement. Sur cette période, les variations contiennent donc une part aléatoire qui ressort probablement de l'hétérogénéité spatiale du comportement des aquifères d'une année sur l'autre; l'incidence cumulée d'années successives doit déjà être prise en compte.

Les choses changent du tout au tout au cours des dernières années. Avec 14 valeurs supplémentaires, la moyenne du coefficient de tarissement (84 ans) passe à 0.0202 j^{-1} et l'écart-type à 0.0042 j^{-1} (multiplié par 3) ($Cv = 0.208$). L'échantillon de la période 1973-87 a pour valeur moyenne 0.0178 j^{-1} avec un écart-type de 0.0053 j^{-1} ($Cv = 0.191$). Il s'agit donc d'un véritable bond des valeurs du coefficient de tarissement, avec un maximum de 0.0380 j^{-1} en 1984, bien proche de la phase d'épuisement évoquée plus haut.

La figure 3 illustre ces variations et le changement majeur du

Tableau 1 Fleuve Sénégal à Bakel: module débit maximum et coefficient de tarissement principal

Année hydro	Module (m ³ /s)	Q max (m ³ /s)	Coef. taris 10 ⁻² j ⁻¹	Année hydro	Module (m ³ /s)	Q max (m ³ /s)	Coef. taris 10 ⁻² j ⁻¹
1903-04	631	3 560	1.73	1945-46	945	6 480	1.89
04-05	737	4 790	1.89	46-47	745	4 460	1.95
05-06	874	3 840	1.82	47-48	666	4 360	1.77
06-07	1 233	9 340	1.77	48-49	572	3 590	1.84
07-08	521	2 850	1.89	49-50	467	3 760	1.77
08-09	767	4 200	1.89	50-51	1 152	7 630	2.11
09-10	902	5 490	1.84	51-52	842	5 340	2.05
10-11	670	3 840	1.87	52-53	718	5 060	2.17
11-12	537	3 330	1.95	53-54	631	4 180	1.95
12-13	564	3 290	1.87	54-55	1 068	6 610	1.92
13-14	270	1 040	2.33	55-56	1 049	5 260	1.77
14-15	444	1 885	1.80	56-57	952	6 050	1.66
15-16	592	3 140	1.90	57-58	1 029	5 660	1.89
16-17	691	4 200	1.87	58-59	1 037	8 170	1.71
17-18	647	4 960	1.92	59-60	788	5 460	1.76
18-19	1 144	7 300	1.67	60-61	621	3 550	1.82
19-20	530	3 560	1.84	61-62	944	7 030	1.74
20-21	834	5 630	2.04	62-63	969	4 410	1.93
21-22	431	2 850	1.87	63-64	666	3 760	1.98
22-23	1 219	9 070	2.07	64-65	970	7 180	1.68
23-24	754	4 670	1.93	65-66	1 048	7 000	1.74
24-25	1 247	6 350	1.87	66-67	841	5 450	1.72
25-26	841	4 610	1.57	67-68	1 037	5 820	1.62
26-27	521	2 290	1.89	68-69	397	2 880	1.89
27-28	1 075	6 460	1.72	69-70	764	3 770	2.11
28-29	904	5 490	1.92	70-71	542	3 440	1.92
29-30	899	5 490	1.89	71-72	598	4 320	2.15
30-31	839	4 610	1.74	72-73	263	1 430	2.02
31-32	739	4 300	1.80	73-74	361	2 550	2.09
32-33	770	4 850	1.78	74-75	760	5 780	2.62
33-34	838	5 490	1.93	75-76	602	5 000	2.56
34-35	700	5 340	1.78	76-77	470	2 500	2.40
35-36	1 164	6 680	1.81	77-78	324	2 700	2.17
36-37	1 234	7 600	1.57	78-79	523	3 250	2.28
37-38	644	5 590	1.90	79-80	401	1 760	2.84
38-39	807	5 630	1.80	80-81	302	3 640	2.84
39-40	559	3 400	1.86	81-82	423	2 840	2.78
40-41	430	2 760	1.82	82-83	303	2 280	2.56
41-42	417	2 890	1.87	83-84	220	1 240	3.28
42-43	437	3 590	1.92	84-85	205	917	3.80
43-44	666	3 480	1.87	85-86	356	2 370	3.43
44-45	330	1 740	1.78	86-87	(337)	2 681	3.28

comportement hydrogéologique du bassin versant depuis la période sèche récente. Les moyennes mobiles pondérées des figures 2 et 3 sont obtenues par l'expression:

$$\ddot{x}_0 = \frac{1}{2} \sum_{t=0}^n x_i e^{-0.7(t_0-t_i)}$$

Les aquifères sont considérablement affaiblis en ressources (baisse du niveau piézométrique parfois supérieur à 15 m) et en extension spatiale (a dépend par la loi de Darcy des caractéristiques géométriques des aquifères).

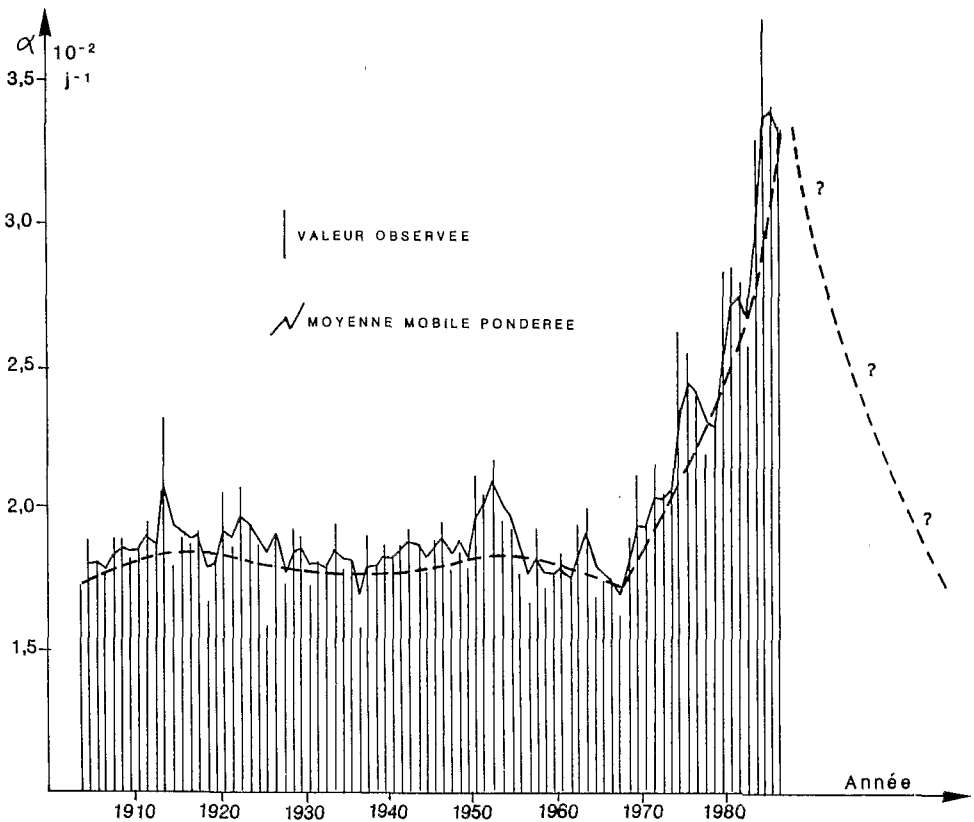


Figure 3 Evolution des coefficients de tarissement du fleuve Sénégal à Bakel.

Actuellement, le déficit des ressources souterraines disponibles pendant la phase principale du tarissement est de l'ordre de 10^9 m^3 ce qui correspond à un débit moyen sur la période de $90 \text{ à } 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ et un déficit de $25 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ sur le module qui aurait pu être observé dans des conditions hydrogéologiques normales. Pour relativement minime qu'il soit, ce déficit survient en saison sèche et ne peut être modifié dans l'évaluation de la ressource disponible à cette époque.

Les années 1985 et 1986 n'ont pas apporté d'amélioration sensible des conditions hydrogéologiques et l'on peut craindre que celles-ci ne se rétablissent pas avant de longues années en supposant que l'on retrouve rapidement des années de fortes précipitations. Si la tendance sèche s'inverse aujourd'hui, un retour à un coefficient de tarissement de l'ordre de $0.019 \text{ à } 0.020 \text{ j}^{-1}$ suppose au minimum une durée égale à celle du phénomène de dégradation soit près de 15 ans.

Il faudra probablement davantage car on ne peut comparer l'appauvrissement des nappes phréatiques par écoulement à leur recharge par cheminement interstitiel de la lame d'eau filtrée à travers une tranche aérée du matériau aquifère (dont l'épaisseur a considérablement augmenté par suite de la baisse du niveau piézométrique).

L'hypersalinisation de la Basse-Casamance

La Basse-Casamance, située au sud du Sénégal et de la Gambie, est une région caractérisée par le développement des milieux paraliques consécutifs à la profonde pénétration des eaux marines dans des rias aux nombreuses circonvolutions. Ces rias et les vallées qui les prolongent, creusées lors de la régression préholocène (15000-30000 B.P.) dans le plateau du continental terminal sont plus ou moins comblées depuis la transgression nouakchottienne (5000 B.P.) (P. Michel, 1960, 1971). Elles forment une constante du paysage avec des bas-fonds larges de quelques kilomètres à quelques hectomètres, où la mangrove a pu se développer avec ses sols caractéristiques et ses zones de "tannes" sursalés, et en bordure desquels s'est installée une riziculture traditionnelle qui a fait la richesse économique de cette région jusqu'à la crise climatique actuelle. Des interfluves ne dépassant pas une altitude de 30 à 40 m, couverts d'une forêt sèche plus ou moins claire complètent ce paysage essentiellement marqué par la présence de l'eau et l'absence de reliefs.

En complément d'études générales sur le bief principal de la Casamance (Y. Brunet, Moret 1970), des recherches de détail ont porté sur ses tributaires nord: le Marigot de Baila (A: 1700 km²) et le Marigot de Biguona (A: 800 km² à Elora).

Depuis ces dernières années, on observe une modification fondamentale des mécanismes réglant les variations spatiales et saisonnières de la salinité en Basse-Casamance; les phénomènes peuvent être décrits suivant les deux périodes d'observation:

(1) Mécanismes de la salinisation de la Basse-Casamance en période "normale" de précipitations moyennes à fortes:

Les études antérieures à l'actuelle période déficitaire (Olivry et al., 1981) ont mis en évidence, pendant la saison sèche, un fonctionnement classique de progressive salinisation du réseau hydrographique soumis à l'influence des marées; cette progressive salinisation, dans le temps et de l'aval vers l'amont, est due à une compensation des pertes par évaporation par un excédent des volumes du flot (venu de l'aval) par rapport aux volumes du jusant (ces volumes sont induits par l'onde de marée).

En saison des pluies, précipitations directes et apports des écoulements de surface suffisent à un retrait marqué sinon total de la salure; le "rincage" des marigots est d'autant plus fort que l'on est près de la source des apports.

Les concentrations en sels suivent, en toute saison, et de l'aval vers l'amont, un gradient négatif, les maximums dépassant rarement 35 g/l.

Les bilans hydrologiques ont montré de faibles coefficients d'écoulement de surface pour la partie continentale des bassins (6% en année moyenne pour 1200 à 1400 mm de précipitation et beaucoup moins en années sèches) et un terme non négligeable au niveau de l'infiltration. Ce terme comprend la recharge proprement dite des nappes et la lame d'eau reprise par évapotranspiration pendant les mois de saison sèche. Mais la nappe phréatique est mal connue (niveau piézométrique à 10 ou 15 m sous la surface topographique au coeur des interfluves, amplitude annuelle de 1 à 2 m) et l'importance de ses apports potentiels n'a pu être évaluée; toujours est-il que ces

apports souterrains compensent partiellement l'évaporation sur les surfaces d'eau libre du marigot en limitant ainsi la progression du sel vers l'amont.

On verra dans la figure 5(a) (années 70-71) que les concentrations restent généralement inférieures à 35g/l sur le marigot de Baila en saison sèche sauf éventuelle sursalure dans l'estuaire et rejoignent celles d'eaux douces au cours de la saison des pluies.

(2) Hypersalinisation de la Basse-Casamance en période "sèche" et ses conséquences durables:

La succession d'années sèches observées depuis 1972, et surtout depuis 1979 a modifié complètement les conditions écologiques de la Basse-Casamance; la mangrove meurt, les rizières sursalées sont abandonnées; la forêt claire s'étoile, les nappes baissent (de plus de 10 m parfois).

La chronique des précipitations annuelles relevées à Bignona pour les bassins étudiés est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2

Année	Total en mm	Année	Total en mm	Année	Total en mm
1954	1806	1968	827	1980	619
1955	1633	1969	1465	1981	1030
1956	1585	1970	1163	1982	933
1957	1391	1971	905	1983	656
1958	2189	1972	452	1984	915
1959	1176	1973	1054	1985	1125
1962	1274	1974	1084	198	1000
1963	1100	1975	1352	Moy.	1196
1964	1118	1976	1209	E.T.	388
1965	1766	1977	848	Cv	0,324
1966	1247	1978	1499		
1967	1795	1979	873		

Depuis 1979, un déficit chronique apparaît malgré une légère reprise en 1985 et 1986. Il est responsable d'une évolution tout à fait différente des concentrations en sel. Pour une même station les valeurs sont beaucoup plus fortes qu'en période normale: c'est l'hypersalinisation qui apparaît et reste présente pratiquement en toute saison. La figure 4 montre l'extraordinaire progression de la salinité à partir de 1980, même si 1982 amène un quasi-adoucissement du marigot à Djibidione. Les maximums absolus dépassent 100 g/l depuis 1981 et atteignent même 154 g/l en 1984 à la station de Djibidione située à 158 km de l'Océan.

Les variations saisonnières sont illustrées dans la figure 5 (b). On retrouve bien le gradient négatif de salinité de l'aval vers

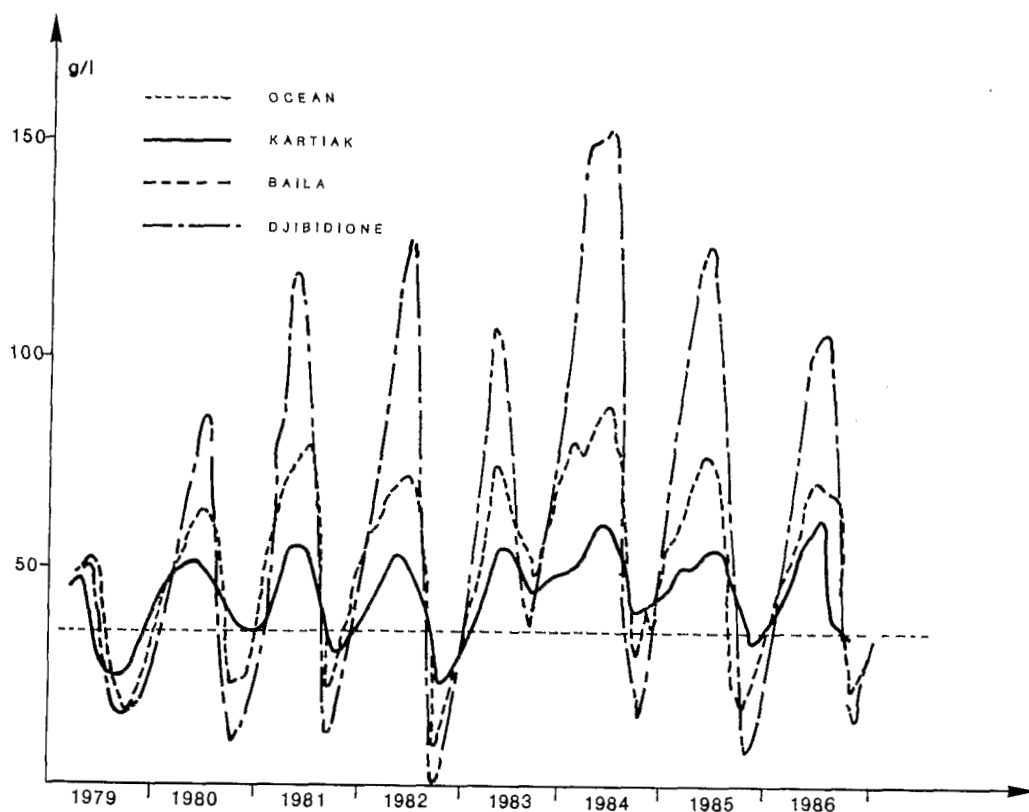


Figure 4 Variations de la salinité sur trois stations du marigot de Baïla.

l'amont observé en période normale pour la saison des pluies (sauf en 1983 vraiment très déficitaire); les phases d'adoucissement sont directement liées à l'importance des apports de saison des pluies. On observe surtout en saison sèche une renverse du gradient qui devient largement positif; par suite les amplitudes de variation de concentration sont d'autant plus grandes que l'on remonte vers l'amont.

Gallaire (1981) a relevé en 1979 des valeurs relativement stables d'une station à l'autre; entre 90 et 158 km de la mer les maximums tournaient autour de 50 g/l. Cette année 1979 paraît être le tournant pour le marigot de Baïla de l'inversion du gradient de salinité.

La figure 6 montre les différentes courbes annuelles des maximums de salinité relevés aux différentes stations de marigot de Baïla (Olivry, Dacosta 1984). Le gradient devenu positif depuis 1980 ne cesse d'augmenter jusqu'en 1984. Il n'y a pas de liaison simple entre celui-ci et la pluviométrie de l'année précédente (plutôt avec un cumul des pluies des années antérieures).

Le mécanisme d'hypersalinisation du marigot correspond au fonctionnement d'un marais salant.

Le rôle plus ou moins compensateur des apports des nappes phréatiques pendant la saison sèche ayant pratiquement disparu,

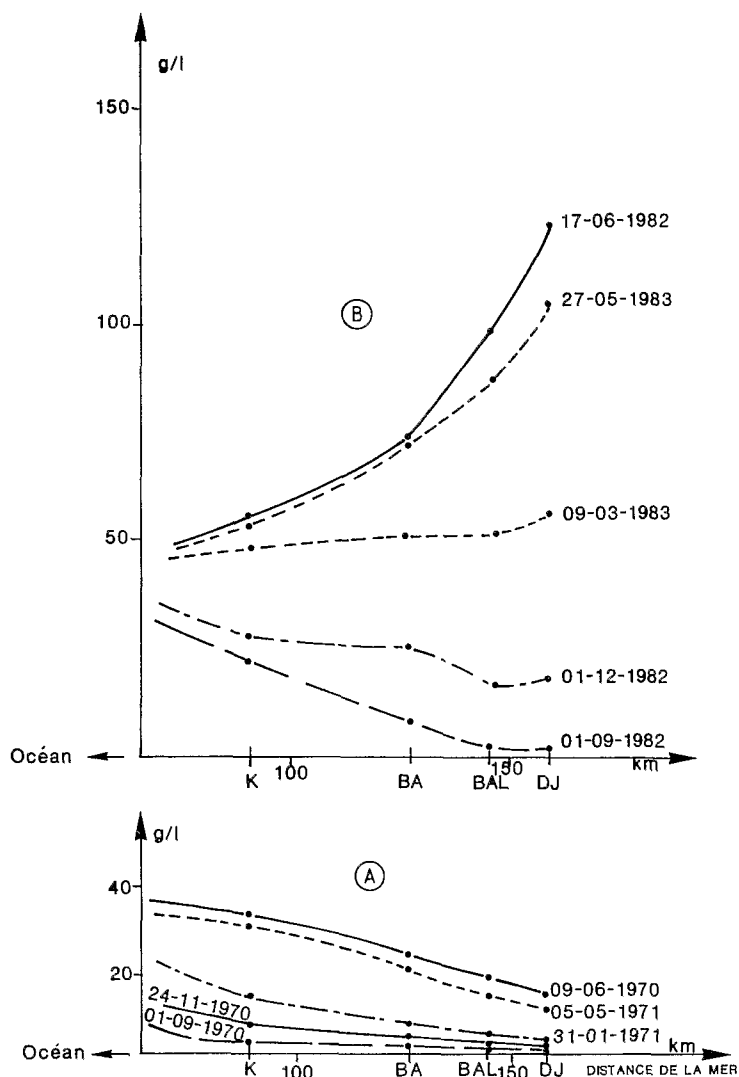


Figure 5 Evolution saisonnière des salinités sur le marigot de Baila: (a) en période normale et humide année 1970-1971; (b) en période déficitaire année 1982-1983.

l'évaporation régulière du marigot appelle de l'aval des volumes chargés en NaCl toujours plus importants par rapport au volume du bief concerné. Ceci explique que la progression de la sursalure augmente en remontant vers l'amont.

La détérioration des conditions hydrogéologiques, résultat de quinze années de déficits pluviométriques, constitue de toute évidence un phénomène durable. Les années 1984, 85 et 86 ont été plus abondantes sans toutefois atteindre la normale; elles n'ont cependant pas apporté d'amélioration vraiment notable au niveau des

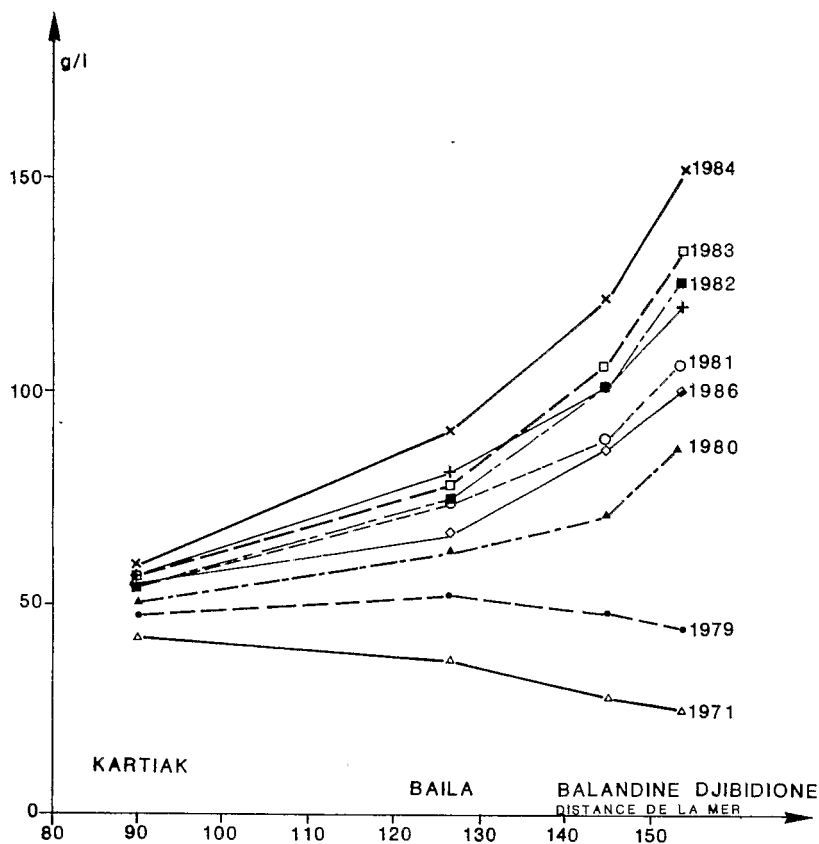


Figure 6 Evolution des concentrations maximales observées en fin de saison sèche sur le marigot de Baila.

concentrations en sel de saison sèche les apports occultés de la nappe aux marigots sont probablement toujours aussi faibles, et la recharge des nappes demandera de nombreuses années.

Dans des conditions climatiques optimales la Basse-Casamance peut rapidement retrouver un adoucissement de ses eaux en saison humide; mais elle restera marquée, dès la saison sèche, pendant encore de longues années par une hypersalinisation des marigots.

Références

- Brunet-Moret, Y. (1970) Etudes hydrologiques en Casamance. Cah. Orstom, sér. hydrol. Paris vol XII-2.
- Gallaire, R. (1980) Etude hydrologique du marigot de Baila, Ortom Dakar.
- Michel, P. (1960) Recherches géomorphologiques en Casamance et en Gambie méridionale. BRGM Dakar.
- Michel, P. (1971) Les bassins des fleuves Sénégal et Gambie. Etude



- géomorphologique. Thèse Doctorat d'Etat. Fac Lettres Strasbourg.
- Olivry, J.C., Chouret, A. (1981) Etude hydrologique du Marigot de Bignona - campagne 1970-71. Orstom-Dakar.
- Olivry, J.C. (1983) Le point en 1982 sur la sécheresse en Sénégal et aux Iles du Cap Vert. Cah. Orstom. Sér. hydrol. Vol. XX n°1.
- Olivry, J.C., Dacosta, H. (1984) Le Marigot de Baila. Bilan des apports hydriques et évolution de la salinité. Orstom Dakar.
- Olivry, J.C., Chastanet (1986) Evolution de l'hydraulicité du Fleuve Sénégal et des précipitations dans son cours inférieur depuis le milieu du XIXeme siècle. Colloque Nordeste-Sahel. IHEAL Paris, Janv. 86.
- Olivry, J.C. (1986) Possibilités d'allegement des réseaux hydrométriques dans les pays en voie de développement après réalisation de synthèses hydrologiques régionales. Proceedings of the Budapest Symposium July 86. IAHS Publ. n°158.
- Rochette, C. (1974) Le bassin du Fleuve Sénégal. Monographies hydrologiques ORSTOM Paris.
- Sircoulon, D. (1985) La sécheresse en Afrique de l'Ouest. Comparaison des années 1982-84 avec les années 72-73. Cah. ORSTOM. Sér. Hydrol. Vol. N°4 85-85.